

DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.09>*Д. В. Середя, Я. В. Балло**Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, м. Київ, Україна*ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9645-5864> – Д. В. Середя<https://orcid.org/0000-0002-9044-1293> – Я. В. Балло✉ seredadmitriy2019@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОТИПОЖЕЖНИХ ВІДСТАНЕЙ ДЛЯ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

Чинні будівельні норми визначають вимоги щодо мінімальних протипожежних відстаней між будівлями та спорудами, ураховуючи відстань між зовнішніми стінами й іншими суміжними конструкціями. Для зовнішніх енергетичних установок, таких як вітрові електроустановки, ці вимоги встановлені частково в галузевих нормах, проте більшою мірою вони спрямовані на дотримання санітарних вимог. Наприклад, вони мають бути розташовані не менше ніж за 1 км від житлових будинків і на відстані не менше трьох діаметрів лопатей ротора від сусідніх об'єктів. Однак чинні норми неповністю враховують потенційні ризики виникнення й розвитку пожеж на вітрових електроустановках, особливо у випадку руйнування їх конструкції. Таким чином, постає завдання щодо необхідності вдосконалити методіку визначення протипожежних відстаней, ураховуючи конструктивні параметри вітрових електроустановок і можливі сценарії розвитку пожежі.

Мета статті полягає у визначенні шляхів удосконалення методу встановлення протипожежних відстаней від вітрових електроустановок до суміжних об'єктів з урахуванням їх потенційних небезпек, пов'язаних із пожежею.

У роботі використано методи узагальнення попередніх досліджень щодо аналізу методіки визначення протипожежних відстаней між об'єктами, метод аналітичного дослідження, а також методи порівняння й аналогії.

Проаналізовано потенційні пожежонебезпечні й аварійні ситуації, що супроводжуються руйнуванням вітрових електростанцій; з'ясовано чинники, які впливають на точність визначення протипожежних відстаней залежно від типів (потужності) вітрових електростанцій; досліджено методологію визначення безпечних протипожежних відстаней і виявлено шляхи її вдосконалення; визначено критерії, які можуть характеризувати умови дотримання пожежної безпеки в частині протипожежних відстаней.

Отже, визначено найбільш несприятливі умови поширення пожежі на суміжні об'єкти від вітрових електроустановок, які полягають у можливості механічного руйнування таких електроустановок, що, як наслідок, може призвести до зменшення встановлених протипожежних відстаней і поширення пожежі на суміжний об'єкт. Систематизовано технічні параметри вітрових електроустановок з урахуванням залежностей щодо пропорційного збільшення їх висоти, потужності й кількості пожежного навантаження всередині їх корпусу, що може суттєво впливати на точність визначення протипожежних відстаней. Запропоновано для збільшення точності прогнозування обмеження поширення пожежі між суміжними об'єктами в разі виникнення аварійних ситуацій, спричинених механічним пошкодженням вітрових електроустановок, що супроводжується виникненням пожежі, урахувати значення висоти опори вітрової електроустановки, площі розливу оливи, що утворюється внаслідок руйнації оливонаповнених вузлів та агрегатів.

Ключові слова: вітрова електроустановка, протипожежні відстані, пожежна безпека, обмеження поширення пожежі, аварійні сценарії пожежі.

IMPROVEMENT OF THE CALCULATION METHOD FOR DETERMINING FIRE DISTANCES FOR WIND POWER PLANTS

Existing building regulations determine the requirements for minimum fire distances between buildings and structures, taking into account the distance between external walls and other adjacent structures. For external energy installations, such as wind turbines, these requirements are set partly in industry regulations, but to a greater extent they are aimed at compliance with sanitary requirements. For example, they should be located at least 1 km from residential buildings and at a distance of at least three diameters of the rotor blades from neighboring objects. However, the existing regulations do not fully take into account the potential risks of the occurrence and development of fires at wind power plants, especially in case of destruction of their structure. Thus, there is a task regarding the need to improve the method of determining fire protection distances, taking into account the design parameters of wind power plants and possible fire development scenarios.

The purpose of the work is to determine ways to improve the method of establishing fire-fighting distances from wind turbines to adjacent objects, taking into account their potential fire hazards.

The work used the methods of generalization of previous studies on the analysis of the method of determining fire protection distances between objects, the method of analytical research, as well as the methods of comparison and analogy.

An analysis of potential fire-hazardous and emergency situations accompanied by the destruction of wind power plants was carried out; the factors affecting the accuracy of determining fire protection distances depending on the types (power) of wind power plants are determined; the methodology of determining safe fire distances was investigated and ways of its improvement were identified; criteria are defined that can characterize the conditions of compliance with fire safety in terms of fire protection distances.

The most unfavorable conditions for the spread of fire to adjacent objects from wind power plants have been determined, which consist in the possibility of mechanical destruction of such power plants, which, as a result, can lead to a decrease in the established fire protection distances and cause the fire to spread to the adjacent object. The technical parameters of wind power plants are systematized, taking into account the dependence on the proportional increase in their height, power and the amount of fire load in the middle of their housing, which can significantly affect the accuracy of determining fire protection distances. It is proposed to increase the accuracy of forecasting the limitation of the spread of fire between adjacent objects in the event of emergency situations caused by mechanical damage to wind power installations, which is accompanied by the occurrence of fire, to take into account the value of the height of the support of the wind power installation, the area of oil spillage, which is formed as a result of the destruction of oil-filled assemblies and units.

Key words: wind power plant, fire distances, fire safety, fire spread limitation, fire emergency scenarios.

Постановка проблеми. Вітрова енергетика є одним і найперспективніших джерел відновлюваної енергії, що є результатом удосконалення сучасних технологій і засобів їх реалізації [1]. Частка відновлюваних джерел енергії в усьому світі швидко зростає, для вітрової енергетики нині становить 3,86%. За даними з відкритих джерел Національної енергетичної компанії «Укренерго», реальна функціонуюча потужність вітрової енергетичного сектору в Україні станом на 2022 рік становить 1529 МВт [2], що фактично перекидає потужність одного ядерного реактора атомної електростанції.

Сьогодні в Україні вимоги щодо мінімальних протипожежних відстаней між будівлями та спорудами визначаються відповідно до будівельних норм [3]. Згідно з вимогами цих норм, протипожежні відстані між будинками й спорудами визначаються з урахуванням відстані між зовнішніми стінами або іншими зовнішніми

огорожувальними конструкціями, зокрема виступаючими елементами даху. Визначення й дотримання протипожежних вимог у частині протипожежних відстаней між будинками або зовнішніми установками є передумовою для забезпечення обмеження поширення пожежі між об'єктами різного функціонального призначення.

Якщо для будівель і споруд із визначеним ступенем вогнестійкості встановлено нормовані значення протипожежних відстаней [3], то для зовнішніх установок, до яких належать вітрові електроустановки, вони визначені лише частково й установлені в галузевих нормах. Наприклад, у документі [4] визначені вимоги до протипожежних відстаней в електроустановках, зокрема відстаней від кабельних мереж та електророзподільних мереж до будинків і споруд тощо. У праці [5] зазначається, що влаштовувати вітрові електроустановки допускається на відстані не менше ніж 1 км від населеного пункту (житлових будинків),

при цьому попередньо здійснивши розрахунок потенційного рівня шуму. Окрім цього, вимоги [5] зазначають, що розміщувати вітрові електроустановки варто на відстані до суміжних об'єктів, що не менше ніж три діаметри лопатей ротору.

Разом із тим, незважаючи на наявність певної нормативної бази й методики визначення мінімально необхідних протипожежних відстаней, варто зауважити, що вони неповною мірою враховують потенційні ризики виникнення та розвитку пожежі, зокрема, на вітрових електроустановках. Чинні підходи визначення протипожежних відстаней не враховують можливості аварійного сценарію, що супроводжується руйнуванням конструкції споруди, зокрема для вітрових електроустановок, який полягає в можливості руйнуванні їх вежі за сценарієм «руйнування-пожежа» або «пожежа-руйнування». Таким чином, постає завдання розглянути шляхи вдосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней з урахуванням конструктивних параметрів вітрових електроустановок при найбільш несприятливих сценаріях розвитку пожежі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У будівельних нормах [6], а також наукових дослідженнях [7; 8] зазначається, коли мінімальні протипожежні відстані не встановлені нормативними документами, то допускається їх визначати за допомогою розрахункових або експериментальних методів.

Для встановлення мінімальних протипожежних відстаней між об'єктами національним стандартом [9] передбачено використовувати такі методологічні підходи визначення безпечних протипожежних відстаней:

- розрахунково-табличний метод визначення протипожежних відстаней;
- спрощений розрахунковий метод визначення протипожежних відстаней;
- розрахунковий метод визначення протипожежних відстаней із використанням рівняння променистого теплообміну й рівняння нестационарної теплопровідності;
- розрахунковий метод визначення протипожежних відстаней із використанням польових моделей.

Під час визначення протипожежної відстані з використанням розрахунково-табличного методу для об'єкта, у якому виникає пожежа, необхідно визначити величину пожежного навантаження всередині об'єкта, коефіцієнт площі прорізів і тривалість теплового опромінювання. У цьому разі тривалість теплового випромінювання може бути однаковою для різних об'єктів функціонального призначення, дорівнювати часу прибуття

й розгортання пожежно-рятувальних підрозділів. Разом із тим цей методологічний підхід не може охопити випадки, коли в конструкції вітрових електростанцій відсутні світлові прорізи, а основне пожежне навантаження сконцентровано в корпусі силової електрогенерувальної установки, яка знаходиться на певній висоті, що залежить від конструкції несучої опори.

У роботі [10] розглядаються проблемні питання дотримання протипожежних відстаней від вітрових електростанцій до лісових масивів та аналізу наслідків лісових пожеж. Проте ці дослідження не розкривають проблемних питань методики оцінювання безпечних протипожежних відстаней і забезпечення технічного регулювання в цій сфері пожежної безпеки.

У роботі [11] представлено аналіз аварійних ситуацій, причин їх виникнення та наслідків у тому числі в результаті виникнення пожеж на електричних вітроустановках. Важливим аспектом цих досліджень є врахування дистанції, на якій спостерігалось руйнування елементів вітрових установках і їх вплив на суміжні об'єкти. На рисунку 1 подано фото типового випадку пошкодження вітрової електростанції та ситуаційну діаграму аварійних випадків, на якій приведено дистанції розсіювання уламків від вітрових електростанцій унаслідок аварій, які виникали в США за 2008–2018 роки [11].

Аналіз діаграми свідчить, що руйнування та розкидування фрагментів вітрових електростанцій значною мірою залежать від напряму обертання робочих лопатей, при цьому в окремих випадках розкид великих уламків становив до 90 м. Отримані дані дають змогу з більшою точністю прогнозувати ризики аварійних ситуацій, у тому числі пожежонебезпечних сценаріїв.

У роботі [12] розглядалися питання аварійних ситуацій на вітрових електростанціях, які супроводжувалися руйнуванням їх несучої опори, проте не розкриваються питання виникнення й розвитку пожежі внаслідок таких аварій, хоча вони й зафіксовані та спричинили значні збитки для суміжної інфраструктури. На рисунку 2 подано фото цих випадків.

Таким чином, аналіз аварійних ситуацій і попередніх досліджень щодо забезпечення обмеження поширення пожеж між об'єктами свідчить, що чинні методи визначення протипожежних відстаней неповною мірою враховують можливість руйнування об'єкта, що призведе до скорочення початкової протипожежної відстані та подальшого виникнення пожежі гондоли, всередині корпусу якої знаходиться оливонаповнені вузли й агрегати. У цьому випадку важливим чинником

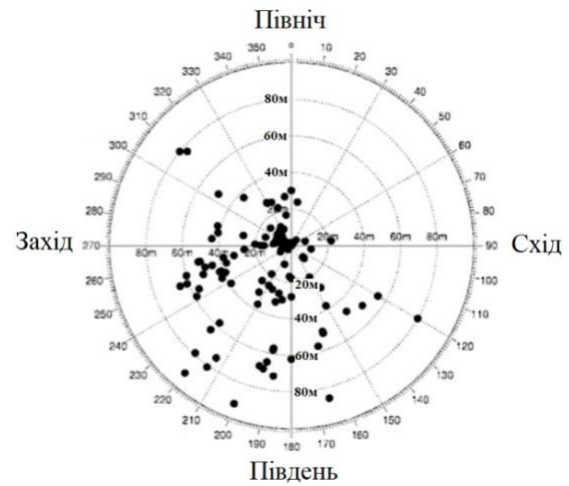


Рис. 1. Фото випадку механічного пошкодження вітрової електроустановки й ситуаційна діаграма дистанції розсіювання їх уламків за 2008–2018 роки



Рис. 2. Фото руйнувань вітрових електроустановок, що супроводжувалися пожежами й пошкодженням прилеглої інфраструктури

є висота башти, на якій встановлено оливонаповнене обладнання й інша горюче навантаження.

Мета статті (постановка завдання) полягає у з'ясуванні шляхів удосконалення методу визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок з урахуванням їх потенційних небезпек.

Для досягнення поставленої мети варто:

- здійснити аналіз потенційних пожежонебезпечних та аварійних ситуацій, що супроводжуються руйнуванням вітрових електростанцій;
- визначити чинники, які впливають на точність визначення протипожежних відстаней залежно від типів (потужності) вітрових електроустановок;
- дослідити методологію визначення безпечних протипожежних відстаней і виявити шляхи її вдосконалення;
- визначити критерії, які можуть характеризувати дотримання умов безпеки в частині протипожежних відстаней.

Методи дослідження. У роботі використано методи узагальнення раніше виконаних досліджень щодо аналізу методики визначення протипожежних відстаней між об'єктами, метод аналітичного дослідження, методи порівняння й аналогії.

Виклад основного матеріалу. Для створення безпечних умов експлуатації вітрових електроустановок, забезпечення їх цілісності й дотримання вимог техніки безпеки при їх обслуговуванні передбачаються заходи із забезпечення дотримання мінімальних протипожежних і технологічних відстаней до промислових об'єктів, трубопроводів, доріг, об'єктів міської інфраструктури тощо. Протипожежна відстань визначається як числове значення довжини прямого відрізка між об'єктами, при якому ризик поширення пожежі з одного об'єкта на інший стає прийнятним до моменту надходження засобів для ліквідації пожежі й захисту суміжних об'єктів.

Наприклад, у 2014 році законодавством Баварії [13] урегульовано питання визначення мінімальної протипожежної відстані від населеного пункту до вітрової електроустановки. Ця відстань повинна бути не менше ніж у 10 разів більшою за висоту вітрової електроустановки. Ця вимога передусім забезпечувала безпеку людей у разі виникнення механічної аварії на вітровій електроустановці, а саме: у випадку відриву частин лопатей у процесі роботи вітрової електроустановки їх частини могли відлітати на відстань, що перевищує в 10 разів висоту вітрової електроустановки. Наприклад,

від вітрової електроустановки висотою 125 м, за принципом балістики, лопать могла відлітати на відстань близько 1300 м від вітрової електроустановки, що наведено на схемі рисунку 3 [14; 15].

Варто відзначити, що цей сценарій аварій і руйнування вітрової електростанції справедливий лише для механічного руйнування (пошкодження) конструкції лопатей і пов'язаний із їх кінетичною енергією обертального руху й ефекту відскоку від землі. Разом із тим можливий сценарій пожежі всередині корпусу гондоли з подальшим її руйнуванням і динамічним відокремленням окремих горючих елементів, які можуть поширити пожежу на суміжні об'єкти.

Також серед можливих сценаріїв поширення пожежі на суміжні об'єкти варто розглянути випадки падіння вежі й пошкодження корпусу гондоли з подальшим розливом оливи. При цьому варто розуміти, що вітрові електроустановки можуть містити до 3 000 л пожежонебезпечних мастильних матеріалів, що використовується для змащення й охолодження механізмів електрогенерації. Відповідно до праць [16; 17], ця технічна олива є горючою рідиною, у разі виникнення несправностей на вітрових електроустановках вона, маючи значне пожежне навантаження, може призвести до пожежі значної площі й, відповідно, сприяти її розвитку та поширенню на суміжні наземні об'єкти інфраструктури.

Окрім ефекту падіння несучої опори, висота якої впливає на скорочення значення довжини дистанції протипожежної відстані, варто враховувати ефект утворення «кратера» від значної ваги гондоли, у корпусі якої знаходиться олива. Цей ефект «кратера» може мати позитивний і негативний вплив на процес поширення пожежі.

Серед позитивних чинників можливого ефекту утворення «кратера» є утворення штучного земляного бар'єру, який локалізує розтікання оливи з гондоли в межах місця її падіння. Негативним явищем ефекту «кратера» є можливість пошкодження підземних комунікацій, зокрема нафтогазопроводів та аналогічних об'єктів критичної енергетичної інфраструктури, які можуть знаходитися в зоні розміщення вітрової електростанції.

З точки зору найгіршого сценарію пожежі, яка супроводжується руйнуванням вежі вітрової електростанції, є руйнування основи та пряме падіння опори вежі в бік суміжного об'єкта, при цьому корпус гондоли розламується при падінні на землю, а мастило розтікається та загоряється. На рисунку 4 подано фото аварії вітрової електростанції висотою 48 м при руйнуванні основи несучої опори вежі.

Таким чином, під час перегляду методу визначення безпечних протипожежних відстаней серед найбільш пожежонебезпечних сценаріїв аварії на вітрових електростанціях можливо відзначити такі випадки:

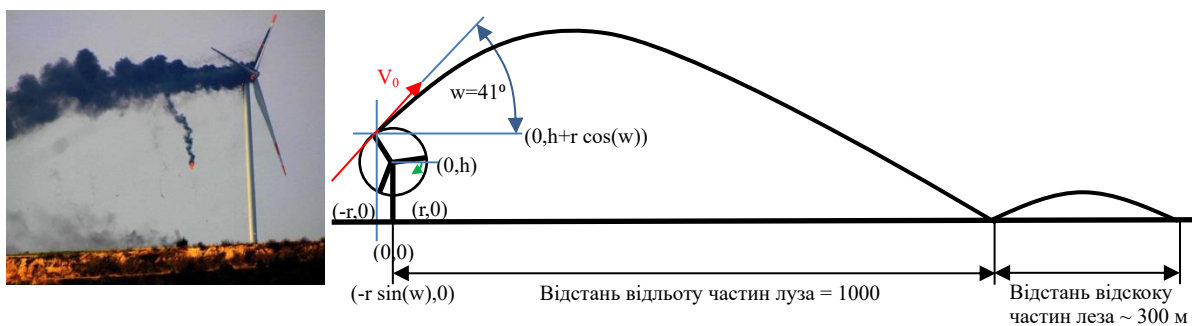


Рис. 3. Схема можливого руйнування й відльоту механічних частин механізму вітрової електроустановки



Рис. 4. Фото падіння вітрової електроустановки через руйнування основи у 2019 році, США

– загоряння й падіння окремих елементів вітрової електростанції в зону розміщення суміжних об'єктів;

– падіння вежі в зону розміщення суміжних об'єктів (часткове чи повне) та подальше займання оливи, що розтікається через механічне пошкодження корпусу гондоли.

Окрім цього, варто враховувати, що висота вежі, діаметр ротора та кількість оливи в механізмах вітрогенерувального обладнання є взаємопов'язаними чинниками, а саме: чим вища вежа, тим більша кількість оливи, відповідно, і пожежного навантаження знаходиться в корпусі установки. У таблиці 1 наведено дані щодо кількості оливи в корпусі гондоли залежно від висоти та потужності вітрової електростанції [18; 19].

Також під час удосконалення методики визначення протипожежних відстаней та обґрунтування небезпечних сценаріїв виникнення пожежі варто враховувати військові загрози, зумовлені умовами сьогодення. Наприклад, 8 січня 2024 року в Білгород-Дністровському районі Одеської області на Дністровській вітровій електростанції компанії Elementum Energy внаслідок влучання ударного безпілотної літального апарата рф у вежу

вітрової електроустановки відбулося її падіння [20]. На рисунку 5 подано фото цієї аварії.

Визначення безпечних протипожежних відстаней із використанням розрахункових методів здійснюється за допомогою процесів теплообміну. Питання взаємозв'язків і впливу теплового потоку від пожежі на суміжні об'єкти досліджувала низка вчених, однак їхні дослідження неповною мірою охоплюють питання визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок.

Для визначення протипожежної відстані за спрощеним методом установлюють тепловий баланс поверхні об'єкта, що сприймає тепло від вогнища пожежі, за певної відстані, коли температура такої поверхні не перевищує допустимої температури. У цьому разі враховують утрати тепла через необігрівну поверхню. Суть цього методу полягає в розв'язанні рівняння теплового балансу, яке найзручніше розв'язати шляхом побудови графіка функції. Мінімальною протипожежною відстанню буде найближче більше ціле значення до точки перетину відповідною кривою осі абсцис. Проте цей метод не завжди застосовний для вітрових електроустановок через їхню специфіку конструкції та аварійних сценаріїв, які описано вище.

Таблиця 1

Дані щодо кількості мастила в корпусі вітрової електроустановці залежно від її висоти

№ з/п	Потужність вітрової електроустановки	Висота башти	Діаметр ротора	Кількість оливи в об'ємі механічної частини ротора
1	30 кВт	18 м	10 м	12 л (±2)
2	75 кВт	22 м	17 м	30 л (±4)
3	100 кВт	24 м	20 м	40 л (±5)
4	200 кВт	30–38 м	25 м	80 л (±12)
5	500 кВт	40–53 м	39 м	200 л (±25)
6	900 кВт	61–73 м	52,2 м	360 л (±40)
7	1,8 МВт	60–78 м	80 м	720 л (±60)
8	3 МВт	80–90 м	90 м	1200 л (±90)
9	3 МВт	84–119 м	112 м	1200 л (±90)
10	4,2 МВт	84–92 м	117 м	1680 л (±100)
11	6,8 МВт	119–169 м	162 м	2720 л (±170)
12	9,5 МВт	Індивідуально	164 м	3800 л (±200)



Рис. 5. Падіння вітрової електроустановки внаслідок удару військового безпілотної літаючого апарату

Розроблена методика [21] дослідження впливу густини теплового потоку на елементи суміжних будівельних об'єктів описує залежність тривалості теплового впливу на протипожежну відстань між об'єктами. Сутність цієї методики визначення протипожежної відстані між об'єктами за критерієм теплового потоку полягає у визначенні його величини на поверхні суміжного будівельного об'єкта, що опромінюється від пожежі об'єкта, що горить (рисунок 6).

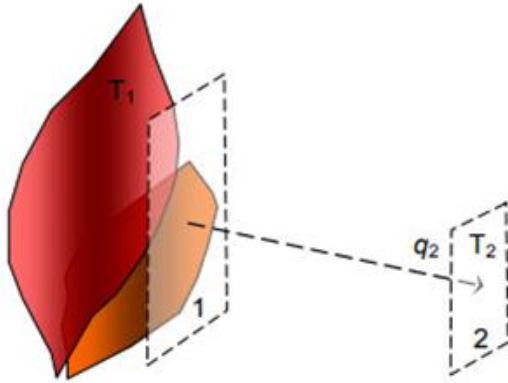


Рис. 6. Схема опромінення тіла 2 факелом, де 1 – зведена до прямокутника поверхня факела полум'я, 2 – зведена до прямокутника поверхня тіла, що опромінюється

Сьогодні під час з'ясування протипожежних відстаней від вітрових електроустановок до суміжних об'єктів за допомогою [9] більшою мірою можливо застосовувати розрахунковий метод визначення протипожежних відстаней із використанням рівняння променевого теплообміну й рівняння нестационарної теплопровідності, а також метод визначення протипожежних відстаней із використанням польових моделей.

Розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней із використанням рівняння променевого теплообміну й рівняння нестационарної теплопровідності дає змогу визначити розрахункову температуру на поверхні суміжного об'єкта, що опромінюється теплом (T_p), за рівнянням теплопередачі, яке ґрунтується на використанні рівняння нестационарної теплопровідності, що має вигляд [22]:

$$c_p \rho \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial z} \right), \quad (1)$$

де T – тривалість теплового опромінювання, с;
 λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу або речовини в будинку, що сприймає тепло від пожежі в суміжному об'єкті будівництва, Вт/(м·°C);

c_p – питома теплоємність матеріалу або речовини в будинку, що сприймає тепло від пожежі в суміжному об'єкті будівництва, Дж/(кг·°C);

ρ – густина матеріалу або речовини в будинку, що сприймає тепло від пожежі суміжного об'єкта будівництва, кг/м³.

При цьому променистий теплообмін між факелом пожежі та поверхнею фасаду суміжного об'єкта розраховують шляхом розв'язання інтегрального рівняння, яке має такий вигляд [22]:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \varphi_{ij}) \sigma \theta_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \varphi_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j, \quad (2)$$

де δ_{ij} – коефіцієнт, що дорівнює 1 при $i = j$ та 0 в інших випадках;

i, j – кількість елементів, на які розбивається поверхня, що випромінює тепло й опромінюється теплом відповідно;

q_j – кількість теплоти, що передається від i поверхні до j поверхні;

$\varphi_{i,j}$ – променевий кутовий коефіцієнт опромінювання, що залежить від взаємного розташування i та j поверхонь.

Значення променевого кутового коефіцієнта опромінювання $\varphi_{i,j}$ визначають так [22]:

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{A_i} \iint_{A_i A_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i, \quad (3)$$

де β – кут між нормаллю до елемента й лінією, яка з'єднує елементи i та j ;

r – відстань між центрами елементів i та j , м;

A_i, A_j – площа елементів поверхонь, що випромінюють тепло й опромінюються теплом відповідно, м².

Таким чином, одним із ключових параметрів, який може вплинути на розрахунок значення протипожежної відстані, є « r » – відстань між центрами елементів « i » та « j ». Якщо для будівель і споруд ця відстань визначається між границями поверхонь, які сприймають тепловий вплив, то для вітрової електроустановки ця протипожежна відстань може змінюватися через такі чинники:

- пошкодження та, як наслідок, падіння гондоли, усередині корпусу якої знаходиться оливонаповнені вузли й агрегати. У даному випадку важливим чинником є висота башти, на якій встановлено оливонаповнене обладнання;

- об'єм (кількість) оливи в агрегатах вітрової електроустановки, яке при пошкодженні корпусу гондоли внаслідок удару вільно розтікається по поверхні землі, тим самим збільшуючи площу потенційної пожежі класу В.

Більшість пожеж вітрових електроустановок виникають усередині гондоли, на її корпусі або на поверхні лопатей, тобто на висоті понад 120 м від поверхні землі. Таким чином, при розрахунку

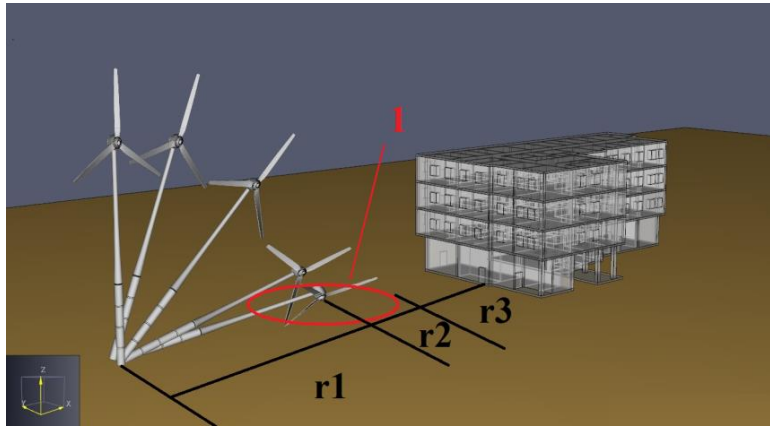


Рис. 7. Схема потенційної аварії та супутніх чинників, які впливають на процес оцінювання протипожежної відстані між вітровою електростанцією й суміжним об'єктом, де r_1 – відстань, яка наближено дорівнює висоті опори вітрової електростанції; r_2 – відстань, яка наближено дорівнює радіусу зони горіння оливи, яка витекла; r_3 – фактична протипожежна відстань від краю зони розливу й горіння оливи до стіни суміжного об'єкта; 1 – потенційна зона розливу оливи з корпусу вітрової електроустановки

протипожежної відстані для вітрових електростанцій із використанням рівняння променистого теплообміну й рівняння нестационарної теплопровідності відстань між центрами елементів, що випромінюють і сприймають тепло, варто враховувати висоту вітрової електроустановки та площу розливу оливи унаслідок руйнації оливонаповнених вузлів та агрегатів. На рисунку 7 наведено візуалізацію уточнювальних коефіцієнтів, які впливають на точність визначення протипожежної відстані від вітрової електроустановки до суміжної будівлі.

Таким чином, удосконалення розрахункового методу визначення протипожежних відстаней для вітрових електроустановок має враховувати не тільки фактичну відстань від зони встановлення вітрової електростанції до суміжного об'єкта, а й потенційні аварійні сценарії, які потребують уточнення параметрів, що впливають на зменшення такої відстані. Такими уточнювальними коефіцієнтами можуть стати коефіцієнти відстані, яка наближено дорівнює висоті опори вітрової електростанції, та, відповідно, відстані, яка наближено дорівнює значенню радіуса в зоні горіння оливи, що може витекти з корпусу гондоли. При цьому значення радіуса прямо пропорційно буде залежати від кількості оливи в корпусі турбіни. У цьому випадку для створення найбільш несприятливих умов можливо знехтувати коефіцієнтами проникнення оливи в ґрунт, а відповідно, не зменшувати її фактичну кількість.

Висновки. На основі проведеного дослідження встановлено, що вітрові електроустановки в разі несправностей можуть призвести до аварійних ситуацій у роботі, включаючи пожежі та їх механічні руйнування. У свою чергу, встановлено численні випадки, коли пожежі від вітрових електроустановок поширюються на лісові

масиви, сільськогосподарські угіддя й суміжні об'єкти інфраструктури.

За результатом аналізу визначено найбільш несприятливі додаткові умови поширення пожежі на суміжні об'єкти від вітрових електроустановок, які полягають у можливості механічного руйнування вітрових електроустановок, що, як наслідок, може призвести до зменшення встановлених протипожежних відстаней і спричинити поширення пожежі на суміжний об'єкт або навіть його руйнування.

Проаналізовано й систематизовано технічні параметри вітрових електроустановок з урахуванням залежностей щодо пропорційного збільшення їх висоти, потужності та кількості пожежного навантаження всередині їх корпусу.

Здійснено аналіз чинної методики визначення протипожежних відстаней і встановлено потенційні шляхи її вдосконалення для збільшення точності прогнозування обмеження поширення пожежі між суміжними об'єктами в разі виникнення аварійних ситуацій, спричинених механічним пошкодженням вітрових електроустановок, що супроводжується виникненням пожежі. Удосконалення чинної методики може бути досягнуто в разі врахування в розрахунках протипожежної відстані з використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності відстані між центрами елементів, що випромінюють і сприймають тепло, з уточненням значення висоти опори вітрової електроустановки, площі розливу оливи, що утворюється внаслідок руйнації оливонаповнених вузлів та агрегатів.

Таким чином, удосконалення методу визначення протипожежних відстаней з урахуванням особливостей вітрових електроустановок є важливим кроком для підвищення точності прогнозування

поширення пожежі на суміжні об'єкти і створення передумов запобігання розвитку можливих аварій, що супроводжуються пожежами.

Список літератури

1. Lin Y., Tu L., Li, H., Li W. Fault analysis of wind turbines in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. № 55. P. 482–490.

2. Вітрова енергетика в Україні та світі. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2022/01/18/vitrova-energetyka-v-ukrayini-ta-sviti/> (дата звернення: 08.02.2024).

3. Планування та забудова територій. ДБН Б.2.2-12:2019 [Чинний від 2019-10-01]. Київ : Мінрегіон України, 2019. 177 с. (Державні будівельні норми України). С. 114–126.

4. Правила улаштування електроустановок. [Чинні від 2017-08-21]. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 614 с. С. 95–375.

5. Правила проектування вітряних електричних станцій ГКД 341.003.001.002-2000 [Чинний від 2000-08-01]. Київ : Мінпалива та енергетики, 2000. 50 с. С. 10–15.

6. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги ДБН В.1.1.7:2016 [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 47 с.

7. Моделювання теплового впливу пожежі через віконний проріз будинку з горючим фасадом на елементи суміжних об'єктів/В.В. Ніжник, Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.С. Некора. *Problems of Emergency Situations* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків : Національний університет цивільного захисту України, 2021. 382 с. С. 65–66.

8. Ніжник В. В. Підходи щодо визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2019. № 53. С. 215–226.

9. Пожежна безпека. Визначення протипожежних відстаней між об'єктами розрахунковими методами. Основні положення ДСТУ 9058:2020 [Чинний від 2021-05-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2021. 24 с. С. 10–11.

10. Butler B. W., Webb J., Hogge J., Wallace T. Vegetation clearance distances to prevent wildland fire caused damage to telecommunication and power transmission infrastructure. *Fires Conference*. 2014. May. 257 p. P. 35–40.

11. SAFETY OF WIND SYSTEMS, URL: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://windfarmaction.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/10/safety-of-wind-systems.pdf](https://windfarmaction.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/10/safety-of-wind-systems.pdf) (дата звернення: 08.02.2024).

12. Mou J., Jia X., Chen P., Chen L. Research on operation safety of offshore wind farms. *Journal of marine science and engineering*. 2021. № 9 (8). P. 881. P. 2–32.

13. Law to change the Bavarian building regulations and the law on official organization construction,

housing and water management *Bavarian Law and Ordinance Gazette*. 2014. URL: <https://www.verkuendung-bayern.de/gvbl/2014-478> (дата звернення: 08.02.2024).

14. Setback distance between wind turbines and dwellings: the new 10H rule protects residents in Bavaria. URL: <http://en.friends-against-wind.org/realities/10h-regel> (дата звернення: 08.02.2024).

15. PUBLIC SAFETY OF INDUSTRIAL WIND POWER PLANTS. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://en.friends-against-wind.org/doc/Dossier-Risques-eoliens.pdf> (дата звернення: 08.02.2024).

16. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація ДСТУ 8829:2019 [Чинний від 2020-01-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2020. 78 с. С. 8–9.

17. Климась Р. В. Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкодження на маслонаповнених трансформаторних підстанціях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 / Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. Львів, 2022. 25 с. С. 5–6.

18. Gear Oil Wind Turbine, Vestas V52-850 kW, Gearbox Upgrade. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://iqoil.co.za/wp-content/uploads/2020/05/WIND_G1-1.pdf (дата звернення: 08.02.2024).

19. Hydraulic Oil Wind Turbine, Vestas V90-2MW, Pitch Hydraulic System. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://iqoil.co.za/wp-content/uploads/2020/05/Wind_Hydraulic-Oil-Wind-Turbine-Vestas-V90-2MW-Pitch-Hydraulic-System_OXHULT_ASWI9007-UK.pdf (дата звернення: 08.02.2024).

20. На Одещині через атаку безпілотною впала вітрова турбіна, російські загарбники пошкодили вже 11 таких. URL: <https://inshe.tv/important/2024-01-09/820297/> (дата звернення: 09.01.2024).

21. Оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти за критерієм теплового потоку / В. В. Ніжник, С. В. Поздєєв, С. В. Жартовський, Ю. Л. Фещук. *Міжнародний науковий журнал: Інтернаука*. 2019. № 73. С. 47–51.

22. Ніжник В. В. Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти : дис. ... докт. техн. наук : 21.06.02. Харків, 2020. 409 с. С. 347–349.

References

1. Lin, Y., Tu, L., Liu, H., & Li, W. (2016). Fault analysis of wind turbines in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 482–490 [in English].

2. Vitrova enerhetyka v Ukraini ta sviti [Wind energy in Ukraine and the world]. (2022). Retrieved from <https://hmarochos.kiev.ua/2022/01/18/vitrova-energetyka-v-ukrayini-ta-sviti/> [in Ukrainian].

3. *Planuvannya ta zabudova teritorij* [Planning and development of territories]. (2019). DBN

V.2.2-12:2019 from 1st October 2019. Kyiv: Minregion Ukrainy [in Ukrainian].

4. *Pravila ulashtuvannya elektroustanovok*. [Rules for arranging electrical installations]. (2017). PUE from 21st August 2017. Kyiv: Minenergouugillya Ukrainy [in Ukrainian].

5. *Pravila proektuvannya vitryanih elektrichnih stancij* [Design rules of wind power plants]. (2000). GKD 341.003.001.002-2000 from 1st August 2000. Kyiv: Minpaliva ta energetiki [in Ukrainian].

6. *Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnictva. Zagalni vimogi* [Fire safety of construction sites. general requirements]. (2017). DBN V.1.1.7:2016 from 1st June 2017. Kyiv: Minregion Ukrainy [in Ukrainian].

7. Nizhnyk, V. V., Feshchuk, Yu. L., Pozdieiev, S. V., & Nekora, V. S. (2019). Modeliuvannya teplovoho vplyvu pozhezhi cherez vikonnyi proriz budynku z horiuchym fasadom na elementy sumizhnykh obektiv. [Modeling the thermal effect of a fire through a window opening of a building with a burning facade on the elements of adjacent objects]. In *Problems of Emergency Situations: Problems of Emergency Situations: materials of the International Scientific and Practical Conference* (pp. 65-66). May 20, 2021 Kharkiv, Ukraine [in Ukrainian].

8. Nizhnyk, V. V. (2019). Pidkhody shchodo vyznachennia protypozhezhnykh vidstanei mizh budynkami ta sporudamy. [Approaches to determining fire safety distances between buildings and structures] *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia*. 53. 215–226 [in Ukrainian].

9. *Pozhezhna bezpeka. Vyznachennia protypozhezhnykh vidstanej mizh ob'ektami rozrahunkovimi metodami. Osnovni polozhennia* [Fire Security. Determination of fire protection distances between objects by calculation methods. Substantive provisions]. (2020). DSTU 9058:2020 from 1st May 2020. Kyiv: *Derzhstandart Ukraine* [in Ukrainian].

10. Butler, B. W., Webb, J., Hogge, J., & Wallace, T. (2014). Vegetation clearance distances to prevent wildland fire caused damage to telecommunication and power transmission infrastructure. In *Fires Conference* (p. 257) [in English].

11. SAFETY OF WIND SYSTEMS. (2011). Retrived from <https://windfarmaction.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/10/safety-of-wind-systems.pdf> [in English].

12. Mou, J., Jia, X., Chen, P., & Chen, L. (2021). Research on operation safety of offshore wind farms. *Journal of marine science and engineering*, 9 (8), 881 [in English].

13. Law to change the Bavarian building regulations and the law on official organization construction, housing and water management *Bavarian Law and Ordinance Gazette*. (2014). Retrived from

<https://www.verkuendung-bayern.de/gvbl/2014-478> [in English].

14. Setback distance between wind turbines and dwellings: the new 10H rule protects residents in Bavaria. (2014). Retrived from <http://en.friends-against-wind.org/realities/10h-regel> [in English].

15. PUBLIC SAFETY OF INDUSTRIAL WIND POWER PLANTS. (2007). Retrived from <http://en.friends-against-wind.org/doc/Dossier-Risques-eoliens.pdf> [in English].

16. *Pozhezhovybukhonebezpechnist rechovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia* (2019). [Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods of their determination. Classification]. DSTU 8829:2019 from 1st January 2020. Kyiv: *Derzhstandart Ukraine* [in Ukrainian].

17. Klymas, R. V. (2022). Udoskonalennia metodu prohnozuvannia prypynennia ta poshyrennia horinnia systemoiu vohneperezhkodzhannia na maslonapovnenykh transformatornykh pidstantsiakh [Improvement of the method of predicting the cessation and spread of burning by the fire prevention system at oil-filled transformer substations]. Extended abstract of candidate's thesis. Lviv: LSULS [in Ukrainian].

18. Gear Oil Wind Turbine, Vestas V52-850 kW, Gearbox Upgrade. (2014). Retrived from https://iqoil.co.za/wp-content/uploads/2020/05/WIND_G1-1.pdf [in English].

19. Hydraulic Oil Wind Turbine, Vestas V90-2MW, Pitch Hydraulic System. (2014). Retrived from https://iqoil.co.za/wp-content/uploads/2020/05/Wind_Hydraulic-Oil_Wind-Turbine-Vestas-V90-2MW-Pitch-Hydraulic-System_OXHULT_ASWI9007-UK.pdf [in English].

20. Na Odeshchyni cherez ataku bezpilotnyka vpala vitrova turbina, rosiiski zaharbnyky poshkodyly vzhe 11 takykh (2024). [In Odesa, a wind turbine fell due to a drone attack, the Russian invaders have already damaged 11 of them]. Retrived from <https://inshe.tv/important/2024-01-09/820297/> [in Ukrainian].

21. Nizhnyk, V. V., Pozdieiev, S. V., Zhar-tovskiy, S. V., & Feshchuk, Yu. L. (2019). Otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhezhi na sumizhni budivelni obiekty za kryteriiem teplovoho potoku [Assessment of the danger of fire spreading to adjacent construction objects based on the heat flow criterion]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal: Internauka. K*, (11), 73 [in Ukrainian].

22. Nizhnik V. V. (2020). Rozvytok naukovykh osnov otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhezhi na sumizhni budivelni obiekty [Development of scientific bases for assessing the danger of fire spreading to adjacent construction objects]. Doctor's thesis. Kharkiv [in Ukrainian].

© Д. В. Серета, Я. В. Балло, 2024.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 23.09.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.